

METODO RAPIDO DE CONTROL EN OBRA DE COMPACTACION DE TERRAPLENES

Por JOSE LUIS BLANCO VILLORIA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Se expone a continuación una Norma muy rápida, sencilla y exacta para el control de compactación, basada en otro artículo aparecido en esta Revista, publicado por el compañero F. Guardia Jiménez.

I. PROCEDIMIENTO.

1.1. Se determina la densidad *in situ* en la forma que se describe en la Norma NLT-109, por ejemplo, pero en vez de referida al peso del suelo seco, referida al peso del suelo con su humedad natural.

Se sitúa la densidad húmeda (d') obtenida, en el eje de ordenadas del diagrama del impreso de la presente Norma.

1.2. Al mismo tiempo extraemos muestra de suelo de las inmediaciones del hoyo que se practica para la densidad *in situ*, y con ella obtendremos varios puntos de una curva análoga a la del ensayo de apisonado Proctor, pero tomando ahora en ordenadas, densidades húmedas (D') y, en abscisas, tanto por ciento (100 H) de humedades añadidas con relación al peso del suelo con su humedad natural. Es decir, operaremos de la manera siguiente:

1.2.1. En primer lugar, con el molde, maza, número de capas y golpes por capa, elegidos, compactamos suelo disgregado con su humedad natural. Se enrasa, se pesa, se resta el peso del molde, dividimos por el volumen (V) del mismo, con lo que se obtiene la densidad húmeda (D'_0) correspondiente. Se sitúa en el impreso el punto (0, D'_0).

1.2.2. Se tara una bandeja con los utensilios que se vayan a emplear en el amasado (palustres, guantes, etc.). Se pesa en la bandeja una porción de suelo, preferible 3 Kg. exactos si se emplea el molde de 1 l. y 7 Kg. si es el de 2,318 l. Se añade agua y se amasa. Se pesa todo el conjunto de bandeja, suelo amasado y utensilios empleados en el amasado, de donde se deduce el tanto por ciento de humedad añadida (100 H_1). Se compacta en el molde y de la misma manera que para el punto anterior, ob-

tenemos la correspondiente densidad húmeda (D'_1).

Se sitúa en el impreso el punto (100 H_1 , D'_1).

1.2.3. Se repite la misma operación anterior para otros puntos, añadiendo distintas cantidades de agua (en algún caso pudiera ser preciso obtener algún punto con humedad añadida negativa, para lo cual secaríamos en sus bandejas, una o varias muestras, al sol, al aire o calentando).

2. RESULTADO.

Dibujada la curva "tanto por ciento de humedades añadidas-densidades húmedas", se mira a cuál de las rectas inclinadas es tangente (interpolamos la que sea precisa). Por el punto (0, d') se traza una horizontal hasta que corte a la tangente. La abscisa, leída en la parte superior del diagrama, del punto de intersección, da el tanto por ciento (100 δ) de densidad seca (con relación a la máxima Proctor o densidad patrón) obtenido en la compactación del terraplén.

3. OBSERVACIONES.

Conviene añadir el agua medida con una probeta para situar los puntos de la curva a intervalos adecuados (intervalos de 1 a 2 por 100 de agua añadida), pero después del amasado se pesa, como se dice en 1.2.2, para obtener el tanto por ciento de humedad añadida con exactitud.

Hasta aquí la Norma, que como vemos es muy sencilla.

En el impreso de la Norma se desarrolla un ejemplo.

* * *

La justificación del método es la siguiente:

Se parte de lo expuesto por Francisco Guardia Jiménez en el número de septiembre de 1960 de esta Revista.

TRABAJO N°

DENOMINACION

MUESTRA N°

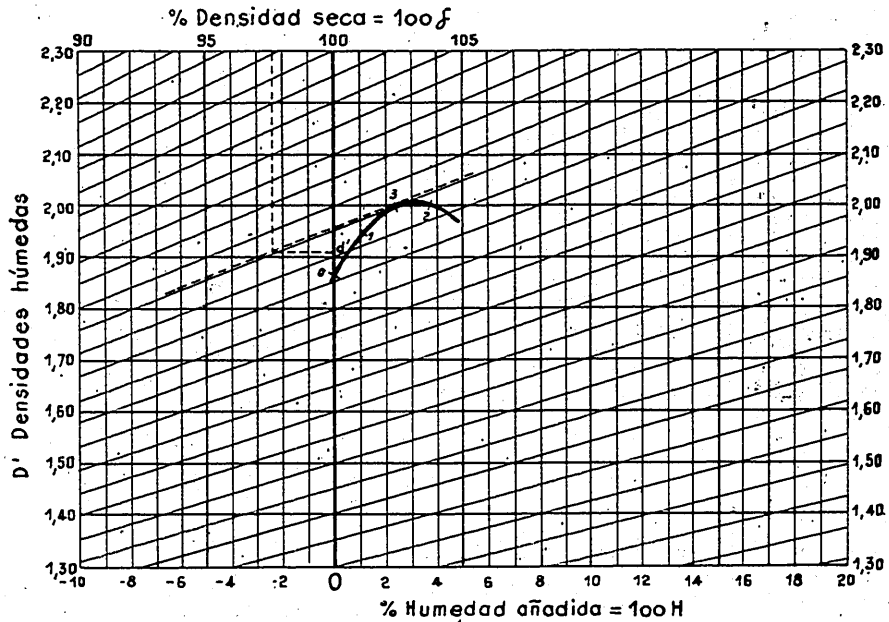
CONTROL DE COMPACTACION EN OBRA

Molde: 1 l.

N° de capas: 3

Maza: pequeña

N° de golpes por capa: 25



Moyo n°

d'	Densidad húmeda	1,909		
100 ρ	% de densidad Proctor	97,6		

Descripción del suelo y observaciones: _____

Punto n°

		0	1	2	3		
Humedad añadida	a	Agua añadida	0	35	115	70	
	t + s' + a	Tara + suelo' + agua añadida		4.495	4.575	4.530	
	t + s'	Tara + suelo'		4.460	4.460	4.460	
	t	Tara		1.460	1.460	1.460	
	s'	Suelo'		3.000	3.000	3.000	
	H = 100 $\frac{a}{s'}$	Humedad añadida	0	1,77	3,83	2,33	
Densidad húmeda		Referencia molde	1R	1R	1R	1R	
	V	Volumen molde	1 l	1 l	1 l	1 l	
	t + s' + a	Molde + suelo' + agua añadida	6870	6951	7031	7007	
	t	Molde	5003	5003	5003	5003	
	s' + a	Suelo' + agua añadida	1867	1948	2028	2004	
	D = $\frac{s' + a}{V}$	Densidad húmeda	"	"	"	"	

Llamando h a la humedad natural (tanto por uno) del terreno y d y d' a las densidades seca y húmeda, se verifica:

$$d' = (1 + h) d; \quad [1]$$

y, por consiguiente, el tanto por uno de densidad seca obtenida (relación de la densidad seca obtenida a la máxima Proctor) vale:

$$\delta = \frac{d}{D_p} = \frac{d'}{(1 + h) D_p}; \quad [2]$$

Por otra parte, si añadimos al suelo, que tiene ya su humedad natural, un tanto por uno (H) de hume-

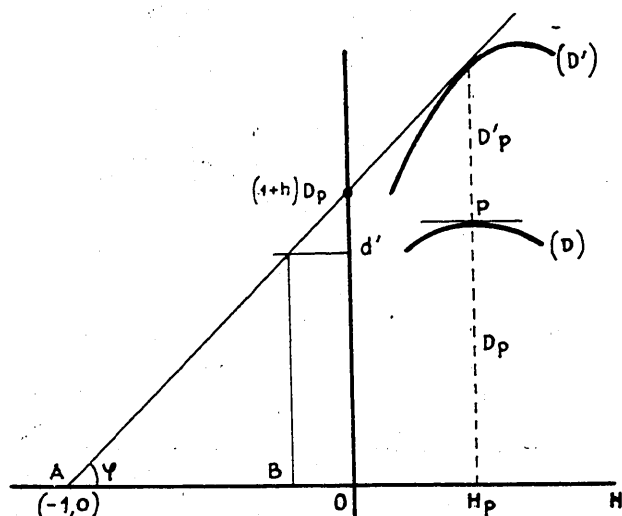


Figura 1.ª.

dad, con relación al peso de ese suelo con su humedad natural, y hacemos una compactación, las correspondientes densidades húmeda (D') y seca (D), vienen relacionadas por:

$$D' = (1 + h) (1 + H) D. \quad [3]$$

Los coeficientes angulares de las tangentes a la curva (D'), vienen dados por la derivada:

$$\frac{dD'}{dH} = (1 + h) (1 + H) \frac{dD}{dH} + (1 + h) D.$$

Particularizando para la abscisa correspondiente a la máxima densidad seca (fig. 1.ª), nos queda:

$$\left(\frac{dD'}{dH} \right)_p = (1 + h) D_p;$$

puesto que $\left(\frac{dD}{dH} \right)_p = 0$.

La ecuación de la tangente es:

$$y - D'_p = (1 + h) D_p (x - H_p);$$

que corta al eje OX en

$$x = H_p - \frac{D'_p}{(1 + h) D_p} = H_p - (1 + H_p) = -1,$$

según [3]. Y al OY en

$$y = D'_p - (1 + h) D_p H_p = (1 + h) (1 + H_p) D_p - (1 + h) D_p H_p = (1 + h) D_p,$$

también, según [3].

Luego vemos que las tangentes mencionadas pasan todas por el punto $(-1, 0)$, si en las abscisas se ponen los tantos por uno de las humedades añadidas, o por $(-100, 0)$, si los tantos son por ciento. Con esta condición se han trazado las rectas inclinadas del diagrama del impreso de la Norma.

La ordenada en el origen $(1 + h) D_p$ es precisamente el denominador de [2], que es también la tangente trigonométrica o coeficiente angular de la tangente geométrica, y, por lo tanto (fig. 1.ª),

$$\delta = \frac{d'}{D_p} = \frac{1}{\tan \varphi} = A B;$$

o sea, la abscisa del punto de intersección de la horizontal de ordenada d' , con la tangente, tomando por origen el punto $A (-100, 0)$, es el tanto por ciento (100δ) de densidad seca.

Si además determinamos la humedad natural (h_0 o 1), tenemos, por un camino inverso, la máxima densidad Proctor (D_p) y la humedad óptima (h_p o 1):

$$D_p = \frac{\text{ordenada en el origen de la tangente}}{1 + h_0}$$

$$h_p = h_0 + (1 + h_0) H_p = (1 + h_0) (1 + H_p) - 1.$$

Mediante el diagrama pueden obtenerse también directamente (figs. 2.ª y 3.ª), aunque es más práctico calcularlas mediante las anteriores expresiones, que son muy sencillas.

También tenemos que la curva Proctor viene definida por:

$$\begin{cases} h = (1 + h_0) (1 + H) - 1 \\ D = \frac{D'}{(1 + h_0) (1 + H)} \end{cases}$$

El método de control de compactación húmedo es francamente útil cuando los suelos empleados en una obra para construir terraplenes varían. Cuando el suelo es uniforme, esta ventaja ya no es tan pa-

tente, pues podemos hacer de una vez para todas, un ensayo Proctor, y emplear para determinar la densidad *in situ*, por ejemplo, el método corriente del alcohol, que no siempre da resultados aceptables. Si esos resultados no son aceptables o incluso en todo caso, con el método húmedo aún podemos tener una

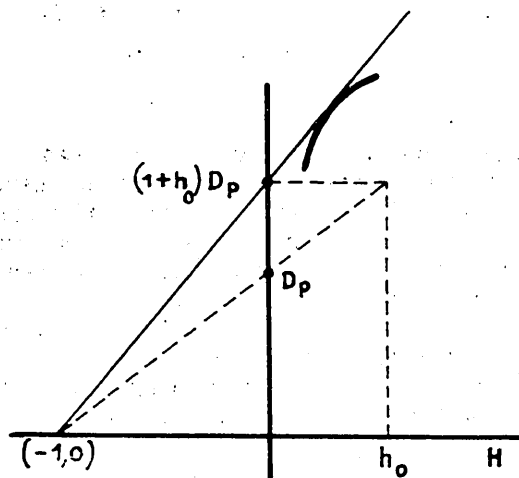


Figura 2.ª.

simplificación más por el hecho de ser el suelo uniforme, que es la siguiente: Al compactar en el molde, suelo con su humedad natural (sin añadir agua) de otro punto de la obra o en otro día, tenemos que

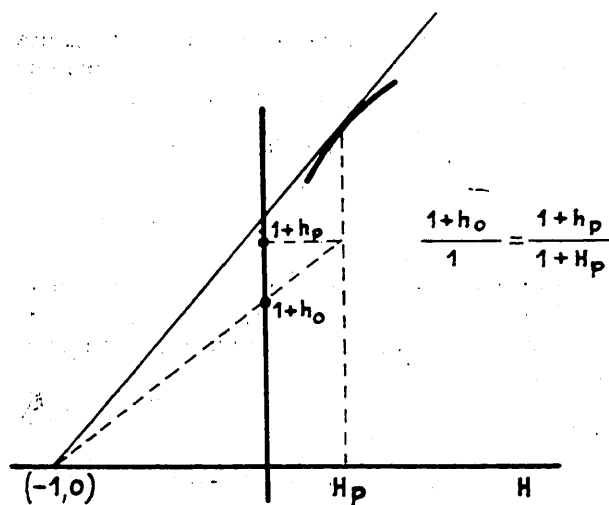


Figura 3.ª.

considerar que el grado de humedad natural puede haber variado, pero entonces, llamando h_1 , h_2 , los tanto por uno de las humedades naturales en dos ensayos, y D'_{o_2} y D'_{o_1} las densidades seca y húmeda después de un apisonado tipo (Proctor normal o modi-

ficado) con el suelo del segundo ensayo, sin añadir agua, se tiene:

$$D'_{o_2} = (1 + h_2) D_{o_2} = (1 + h_1) (1 + H_{1,o_2}) D_{o_2},$$

o sea:

$$1 + h_2 = (1 + h_1) (1 + H_{1,o_2}) \quad [4]$$

llamando H_{1,o_2} la humedad (tanto por uno) que hubiese sido necesario añadir en el primer ensayo para que con el apisonado tipo se obtuviese la densidad seca D_{o_2} (o la húmeda D'_{o_2}); ver figura 4.ª. (La igualdad [4] expresa que las humedades totales son iguales.)

Por otra parte, el tanto por uno de densidad seca

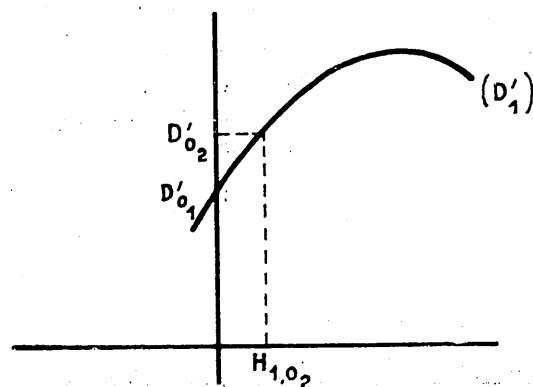


Figura 4.ª.

obtenida en la compactación del terraplén con el segundo ensayo vale:

$$\delta_2 = \frac{d'_2}{\text{tg } \varphi_2} = \frac{d'_2}{\text{tg } \varphi_1} \frac{\text{tg } \varphi_1}{\text{tg } \varphi_2} = \frac{d'_2}{\text{tg } \varphi_1} \frac{(1 + h_1) D_p}{(1 + h_2) D_p},$$

y según [4]:

$$\delta_2 = \frac{d'_2}{\text{tg } \varphi_1} \frac{1}{1 + H_{1,o_2}}.$$

Luego en la curva "humedades añadidas-densidades húmedas" del primer ensayo y con d'_2 , hallamos, como antes, la intersección de la tangente con la horizontal de ordenada d'_2 , y el tanto por ciento de densidad seca que se obtenga, lo dividimos por $1 + H_{1,o_2}$.

Es preciso, tan sólo, pues, determinar, además de d'_2 , D'_{o_2} . Para la determinación de D'_{o_2} , conviene extremar los cuidados o repetir la determinación. El cuidado máximo que se ha de tener, es el de actuar con rapidez para que no varíe la humedad natural h_2 ; a este fin, en la Jefatura de Teruel se construyó una

"escarificadora circular" consistente en una especie de sonda en cuyo eje va una barrena delgada de 25 centímetros y alrededor de ésta, otras barrenas más anchas y cortas (20 cm.) o rejas helicoidales construidas con pletinas retorcidas, todas ellas insertadas en un disco horizontal de 25 cm. de diámetro. Con este sencillo aparato se escarifica y descompacta el terreno y directamente lo tenemos dispuesto para llevar al molde.

Si tenemos dudas de si el terreno sigue siendo uniforme, podemos determinar en el segundo ensayo otro punto, añadiendo una humedad arbitraria H_2 y la densidad húmeda obtenida después del apisonado tipo, será igual a la densidad húmeda que en el primer ensayo corresponde a la humedad añadida H_1 , tal que

$$(1 + h_1)(1 + H_1) = (1 + h_2)(1 + H_2),$$

es decir, densidades iguales para puntos que tengan la misma humedad total. De donde:

$$\frac{1 + H_1}{1 + H_2} = C^{te.},$$

y, por lo tanto:

$$\frac{1 + H_1}{1 + H_2} = 1 + H_{1,02} \quad [5]$$

Si nos apartamos de esta igualdad, el terreno ha variado y entonces determinaremos algún punto más para el segundo control y dibujamos la curva correspondiente.

También [5] puede ponerse bajo la forma:

$$\frac{H_1 - H_2}{1 + H_2} = \frac{H_{1,02}}{1}.$$

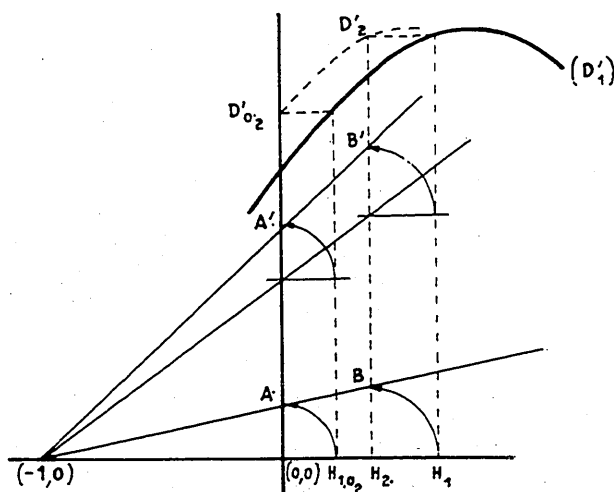


Figura 5.a.

lo que significa que los puntos A y B (fig. 5.a) han de estar en una misma recta inclinada si el suelo es uniforme, pero como el eje OX se sale del diagrama, podemos cambiar por la construcción indicada en la figura.